

УДК 001.891.57

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0001

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

© 2021

**Бусыгин Сергей Валерьевич**, аспирант кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

**Ковальногов Владислав Николаевич**, доктор технических наук,  
заведующий кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

**Чукалин Андрей Валентинович**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика»

*Ульяновский государственный технический университет*

*(432027, Россия, Ульяновск, улица Северный Венец, 32,*

*e-mails: sergey18.06.95@mail.ru, kvn@ulstu.ru, chukalin.andrej@mail.ru)*

**Аннотация.** Большая часть стран в настоящее время осуществляет перевод экономики на низкоуглеродное развитие, которое оказывает свое влияние на энергетическую отрасль страны. Цель перехода – снижение вредного воздействия на окружающую среду. В настоящей статье представлено моделирование процесса горения топливовоздушной смеси на основе природного газа с предложенной переорганизацией рециркуляции дымовых газов на энергетическом паровом котле (далее – котлоагрегат) типа ТГМЕ-464, с применением программного комплекса *Ansys Fluent*. В статье представлены графики распределения содержания  $NO_x$  в зоне активного горения при изменении доли рециркуляции дымовых газов от 0 до 22%. При предложенном процессе переорганизации рециркуляции дымовых газов на котлоагрегате типа ТГМЕ-464 снижение эмиссии вредных веществ объясняется снижением в зоне активного горения максимальной температуры, являющейся основным индикатором образования термических  $NO_x$ . Статья предназначена для аспирантов, докторантов, интересующихся разработкой методов подавления образования  $NO_x$  в продуктах сгорания котлов ТЭС.

**Ключевые слова:** низкоуглеродное развитие, рециркуляция дымовых газов, термические оксиды азота, тепловые электростанции, энергетический паровой котел, зона активного горения, моделирование, *Ansys Fluent*, горелочное устройство, нижний ярус, ТГМЕ-464, природный газ, численный расчет.

## MATHEMATICAL SIMULATION AND EFFICIENCY INVESTIGATION RECIRCULATION OF FLUE GASES OF A POWER-GENERATING BOILER

© 2021

**Busygin Sergey Valerievich**, postgraduate student of the department of Heat and power engineering

**Kovalnogov Vladislav Nikolaevich**, doctor of technical sciences,  
head of the department of Heat and power engineering

**Chukalin Andrey Valentinovich**, candidate of technical sciences,  
assistant professor of the department of Heat and power engineering

*Ulyanovsk State Technical University*

*(432027, Russia, Ulyanovsk, str. Severny Venets, 32,*

*e-mail: sergey18.06.95@mail.ru, kvn@ulstu.ru, chukalin.andrej@mail.ru)*

**Abstract.** An increasing number of countries are now shifting their economies to low-carbon development, which has an impact on the energy sector. The goal of the transition to low – carbon development is to reduce the negative environmental impact. This article presents a simulation of the combustion process of a fuel-air mixture based on natural gas with the proposed organization of flue gas recirculation in the a power-generating boiler of the TGMT-464 type, using the *Ansys Fluent* software package. The article presents graphs of the distribution of the  $NO_x$  content in the active combustion zone when the proportion of flue gas recirculation changes from 0 to 22 %. In the proposed process of organizing the flue gas recirculation on a power-generating boiler of the type TGME-464, the reduction in the emission of harmful substances is explained by a decrease in the peak temperature in the active combustion zone, which is the main indicator of the formation of thermal  $NO_x$ . The article is intended for postgraduates, doctoral students interested in the development of methods for suppressing the formation of  $NO_x$  in the combustion products of TPP boilers.

**Keywords:** low-carbon development, thermal  $NO_x$ , thermal power plants, power-generating boiler, flue gas recirculation, active combustion zone, simulation, *Ansys Fluent*, burner device, bottom level, TGME-464, natural gas, numerical computation.

**Введение.** Большая часть находящихся на различных уровнях развития стран, в настоящее время, осуществляет перевод своей экономики к низкоуглеродному развитию [1]. Цель перехода – снижение вредного воздействия на окружающую среду. Данная цель заложена и в разрабатываемую в настоящий мо-

мент «Стратегию долгосрочного развития РФ до 2050 года с низким уровнем выбросов парниковых газов» [2]. Главная из отраслей экономики, на которую оказывает свое влияние низкоуглеродное развитие – энергетика.

В соответствии с прогнозным спросом на электро-

энергию по Единой энергетической системе России (далее – ЕЭС РФ) до 2026 года ожидается ежегодный прирост потребления электрической энергии, более 1,1% в год. Прогнозная величина производства электроэнергии по ЕЭС РФ к 2026 г. составит более 1150 млрд. кВт·ч, что больше фактической величины потребления электрической энергии 2019 года более чем на 70 млрд. кВт·ч [3]. Наряду с этим, процент тепловых электростанций (далее – ТЭС) в прогнозной структуре производства электроэнергии за период 2020 – 2026 г. по ЕЭС РФ составляет от 62,8% до 66,8%, с устойчивой потребностью в газе 71,7 – 72,5% от общей потребности ТЭС в органическом топливе [3]. Приведенный анализ указывает на то, что при ежегодном приросте потребления электрической энергии, присутствует стабильный рост объема потребления природного газа от 1,1 до 3,8% в год, преимущественно сжигаемого в энергетических котлах ТЭС.

При работе на природном газе, основным загрязняющим элементом в уходящих газах энергетических паровых котлов ТЭС являются термические оксиды азота (далее –  $NO_x$ ) на образование которых в первую очередь оказывает влияние температура в ядре горения, и ряд технических и режимных мероприятий, таких как впрыск влаги в зону горения, рециркуляция дымовых газов [4], секционирование топки, нестехиометрическое и ступенчатое сжигание [5], снижение температуры горячего воздуха, комбинированное сжигание природного газа с биогазом [6] со специальной конструкцией горелок [7] и совместные методы подавления образования оксидов азота направлены [8] на ее снижение.

В настоящее время ГОСТ Р 50831-95 и ГОСТ 28269-89 [9, 10] регламентируют норматив удельных выбросов в атмосферу от энергетических установок, введенных в эксплуатацию на ТЭС, как до, так и после 2000 г., а Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) [11] регламентирует расчет и процесс взимания платы за негативное воздействие на окружающую среду. Для разработки новых технических и режимных мероприятий, направленных на подавление  $NO_x$  важно иметь теоретические данные о влиянии внедряемых мероприятий на количество образовавшихся вредных веществ в зоне активного горения энергетических паровых котлов ТЭС. В настоящее время существует возможность моделирования топочных процессов с возможностью оценки эффективности новых разработанных мероприятий по сокращению эмиссии загрязняющих веществ.

**Целью** научной работы является разработка технических и организационных решений, направленных на подавление образования  $NO_x$  в продуктах сгорания котлов ТЭС с рециркуляцией дымовых газов, на основе предложенной адекватной модели, позволяющей оценить возможную эффективность реализации разработанных мероприятий.

**Материалы и результаты исследования.** 1. Характеристика объекта научной работы. Котлоагрегат

типа ТГМЕ-464 (Е-500-13,8-560ГМН) спроектирован в 60-е годы XX века ПО ТКЗ «Красный котельщик». Котлоагрегат оборудован восьмью горелочными устройствами типа ГМУ-45, предназначенными для раздельного и совместного сжигания газа и мазута и расположенными в два яруса на отметках +6,15 м и +8,75 м на заднем экране. Номинальная тепловая мощность каждой горелки – 45 МВт, общая паропроизводительность данного типа котлов – 300 Гкал/ч (500 тонн пара в час). Горелочное устройство (рис. 1) имеет 2 закручивающих аппарата, предназначенных для закрутки потока воздуха и 2 ряда отверстий разного диаметра, предназначенных для подачи газа. Природный газ подается в пространство между трубами с диаметрами 0,245 м и 0,325 м, расположенными в центральной части горелочного устройства.

Одной из особенностей конструкции данного типа котлов является исполнение труб участка фронтального экрана – теплоизолированного пода, имеющего угол наклона в 150, спроектированного для исключения возможности повреждения экранных труб из-за возможного расслоения потока. Согласно проведенному в работе [12] исследованию установлена еще одна конструктивная особенность – максимум теплового потока ( $470-500 \text{ кВт/м}^2$ ) расположен ниже оси нижнего яруса горелок (+6,15 м), что поясняется развитием пламени горелок нижнего яруса между факелом верхнего яруса и теплоизолированным подом с переизлучением в зону активного горения. При реконструкции в 1998 г. котла ТГМЕ-464 ст. №2 Саратовской ТЭЦ-5 [13] был установлен подовый экран с внутренним винтовым оребрением, но без огнеупорного покрытия. Реализация данного технического решения позволила, за счет исключения переизлучения в зону активного горения, обеспечить снижение выбросов  $NO_x$  до 25-30%.



Рисунок 1 – Эксплуатируемое горелочное устройство типа ГМУ-45 котлоагрегата типа ТГМЕ-464

2. Проведение численного эксперимента с использованием модели. Для определения возможности снижения образования  $NO_x$  в зоне активного горения котлоагрегата типа ТГМЕ-464 применялась модель, разработанная при применении программного комплекса (далее – ПК) *Ansys Fluent*. Данный ПК явля-

ется многоцелевым пакетом, имеющим в своем распоряжении инструменты для моделирования течений жидкости и газа, в том числе включая модуль *Fluent*, решатель которого основан на конечно-объемном методе (МКО) решения [16].

На первом этапе подготовки расчётной модели, с использованием модуля «*Design Modeler*» смоделирована камера сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45 с суммарной производительностью по газу  $Q = 4500 \text{ м}^3/\text{час}$ . С целью получения адекватных результатов, в качестве исходных данных для построения 3D модели горелочного устройства (рис. 2) применялись конструктивные показатели, включая габаритные размеры, количество элементов закручивающего аппарата, углы закруток потока, рядность и количество отверстий выхода газа эксплуатируемого горелочного устройства представленного на рисунке 1. Смоделированная камера сгорания представляет собой цилиндрическую поверхность со следующими геометрическими характеристиками:  $L = 7 \text{ м}$ ;  $D = 1,46 \text{ м}$ .

Генерация расчётной сетки камеры сгорания с одним горелочным устройством осуществлялась с использованием универсального сеточного генератора *Ansys «Meshing»* с методом построения «*Patch Conforming*», преимущественно подходящего для геометрии с мелкими элементами. Визуализация расчётной сетки представлена на рисунке 3: применена нерегулярная структурированная сетка с применением призматических слоев [16] и сгущением элементов в зоне выхода воздуха и природного газа.

На втором этапе определены, используемые в решателе, уравнения движения сплошной среды, свой-

ства применяемых в решении материалов - химических и физических свойств с учетом подачи в камеру сгорания газов рециркуляции, заданы граничные условия. В целом полученные результаты зависят от выбора модели турбулентности. Для исследования тепловых и газодинамических процессов в работе используется модель турбулентности  $k-\epsilon$  (*realizable*), позволяющая моделировать процесс горения топливо-воздушной смеси котлов при сжигании газа и оценить интенсивность образования  $\text{NO}_x$  [14, 15].

В ходе исследования смоделировано горение природного газа в камере сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45, с подачей газов рециркуляции (при  $r = 0 \div 22\%$ ), отбираемых до РВП и вводимых в короб горячего воздуха, так и без подачи газов рециркуляции. Моделируемый расход природного газа  $Q = 3936 \text{ м}^3/\text{час}$ , что соответствует 80% паровой нагрузки котлоагрегата типа ТГМЕ-464 [17]. На рисунке 4 представлены результаты численного расчета разработанной модели при температуре воздуха на входе в горелочное устройство  $T = 477 \text{ К}$  [18] и коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,02$ .

Разработанная и представленная модель успешно позволяет смоделировать процесс горения топливо-воздушной смеси котлов при сжигании газа и оценить интенсивность образования  $\text{NO}_x$ .

Согласно приведенной в п. 1. характеристике объекта научной работы – котлоагрегата типа ТГМЕ-464 установлено, что максимум теплового потока расположен ниже оси нижнего яруса горелок, что свидетельствует о необходимости снижения температуры именно в данной зоне котла.

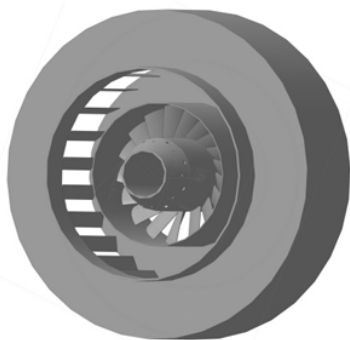


Рисунок 2 – Смоделированное горелочное устройство

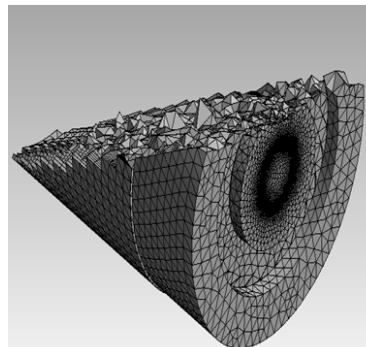


Рисунок 3 – Расчётная сетка камеры сгорания с одним горелочным устройством

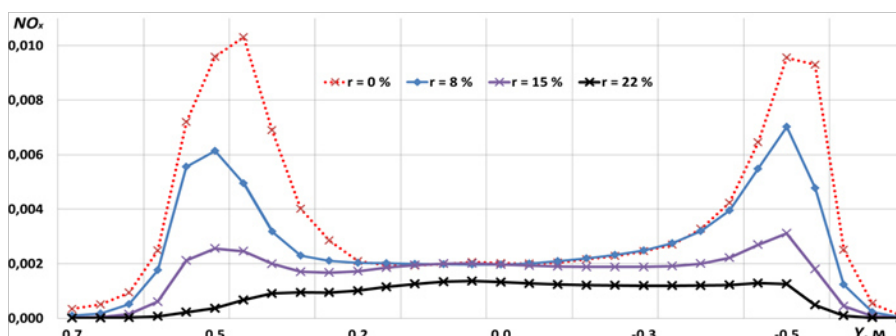


Рисунок 4 – Профиль содержания  $\text{NO}_x$  в вертикальном сечении пламени на расстоянии 2 м от амбразуры смоделированного горелочного устройства (2;Y;0): красная прямая при  $r = 0\%$ ; синяя прямая при  $r = 8\%$ ; фиолетовая прямая при  $r = 15\%$ ; черная прямая при  $r = 22\%$ . Ось ординат – содержание  $\text{NO}_x$ ; ось абсцисс – вертикальное сечение пламени, м.



Из анализа рисунка 4 видно, что при увеличении степени подачи газов рециркуляции ( $r = 0 \div 22\%$ ) происходит снижение содержания  $NO_x$  по фронту факела, что объясняется снижением максимальной температуры, являющейся основным индикатором образования термических  $NO_x$ . Для снижения содержания  $NO_x$  в продуктах сгорания котлоагрегата типа ТГМЕ-464 предлагается снизить температуру в зоне с максимальными тепловыми потоками за счет переорганизации рециркуляции дымовых газов: перераспределив степень подачи газов рециркуляции между первым и вторым ярусами горелок, направив большую их часть к нижнему ярусу.

**3. Проверка адекватности полученных результатов численного эксперимента.** При проведении анализа полученных результатов вычислительного эксперимента, проведенного на ЭВМ в программной среде *Ansys Fluent*, по представленной выше методике, возникает вопрос о соответствии полученных результатов реальной системе.

Для проверки на адекватность предложенной модели проведен литературный обзор экспериментальных данных проведенных в разные годы на котлоагрегатах ТЭС (рис. 5) и изучен профиль содержания  $NO_x$  по длине факела в смоделированной камере сгорания, сформированный по результатам численного эксперимента, проведенного в программной среде *ANSYS Fluent*.

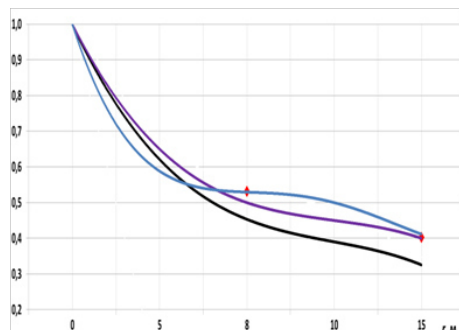


Рисунок 5 – Сравнение экспериментальных данных и результатов численного решения: синяя прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 400-405 т/ч [19], фиолетовая прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 450-460 т/ч [19], черная прямая – котлоагрегат ТГМЕ-464 при производительности 470-480 т/ч [19], красная точка – результаты численного решения. Ось ординат – отношение концентрации  $NO_x$  при некотором значении  $r$  к концентрации при  $r = 0\%$ , определенные по экспериментальным данным и выраженные полиномиальной зависимостью 3-4 степени; ось абсцисс – степень рециркуляции  $r$ , %.

Полученные результаты сопоставимы с экспериментальными данными, отклонение составляет менее 10%, что является удовлетворительным результатом для задач данного уровня и свидетельствует об адекватности предложенной выше модели.

**Заключение.** При применении программной среды *Ansys Fluent*, предложена адекватная модель камеры сгорания с одним горелочным устройством типа ГМУ-45, позволяющая оценить возможную эффективность реализации мероприятий, направленных на подавление образования  $NO_x$  в продуктах сгорания

котлов ТЭС. Для снижения содержания  $NO_x$  в продуктах сгорания котлоагрегата типа ТГМЕ-464 предлагается снизить температуру в зоне с максимальными тепловыми потоками, расположенную между осью нижнего яруса горелок (+6,15 м) и теплоизолированным подом с переизлучением в зону активного горения. Температуру предлагается снизить за счет переорганизации рециркуляции дымовых газов: перераспределив степень подачи газов рециркуляции между первым и вторым ярусами горелок, направив большую их часть к нижнему ярусу.

**Исследования выполнены при поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту НШ-2493.2020.8.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Макаров И.А., Степанов И.А. Парижское соглашение по климату: влияние на мировую энергетику и вызовы для России. – Актуальные проблемы Европы, №1, 2018 – 77-100 с.
2. Проект стратегии долгосрочного развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Режим доступа: [https://economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya\\_rossii\\_podgotovilo\\_proekt\\_strategii\\_dolgosrochnogo\\_razvitiya\\_rossii\\_s\\_nizkim\\_urovнем\\_vybrosov\\_parnikovykh\\_gazov\\_do\\_2050\\_goda\\_.html](https://economy.gov.ru/material/news/minekonomrazvitiya_rossii_podgotovilo_proekt_strategii_dolgosrochnogo_razvitiya_rossii_s_nizkim_urovнем_vybrosov_parnikovykh_gazov_do_2050_goda_.html)
3. Приказ Минэнерго России от 30.06.2020 № 508 «Об утверждении Схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2020 - 2026 годы».
4. Кобзарь С. Г., Халатов А. А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. – Промышленная теплотехника №4, 2009. – С. 5-11.
5. Areklett Ivar, Nygaard Lynn P. Emission-free gas power: Soon realizable - Greenhouse Issues. 2001. № 57. P. 4.
6. Usama J. Mizher, Vladislav N. Kovalnogov, Andrei V. Chukalin, Sergey V. Busygin, and Ruslan V. Fedorov, "Simulation of the processes of combined fuel combustion and analysis of harmful substances emissions", AIP Conference Proceedings 2343, 130010 (2021) <https://doi.org/10.1063/5.0047875>.
7. Патент на полезную модель RU 201 164 от 01.12.2020 г.
8. Росляков П. В., Ионкин И. Л. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ – 464. – Теплоэнергетика №1, 2015. – С. 45-52.
9. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования.
10. ГОСТ 28269-89. Котлы паровые стационарные большой мощности.
11. Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 N 255 (ред. от 17.08.2020) "Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду".
12. Холщев В. В. Сравнительный анализ двух экспериментов, проведенных в разные годы на мазутных котлах. – Электр. ст. № 3, 2001 – С. 12-16.
13. Медведев В. А., Мясникова О. Ю. О модернизации котельного агрегата ТГМЕ-464 Саратовской ТЭЦ-5 с целью снижения выбросов  $NO_x$  путем применения труб с внутренним винтовым оребрением в подовой поверхности нагрева. – Новости теплоснабжения №10, 2013. – С. 28-31.
14. ANSYS FLUENT 12.0. Theory Guide. April, 2009.
15. H. K. Versteeg and W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics. 2nd ed., 2007. 517 p.
16. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.
17. Технический отчет по результатам проведения опытов пересмотра энергетических характеристик энергетического котла типа ТГМЕ-464 ст. № 3, установленного на Чебоксарской ТЭЦ-2, ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг», 2017. – 76 с.
18. Тепловой расчет котла ТГМЕ-464 (нагрузка 50%, топливо – газ), ТКЗ «Красный котельщик», 1976. – 8 с.
19. Петров Ю.И., Меренов А.А., Усман Ю.М. и др. Снижение выбросов  $NO_x$  на котлах ТГМЕ-464 малозатратной реконструкцией горелок. – Электр. ст. № 10, 2001 – С. 2-6.
20. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

Статья поступила в редакцию 27.10.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021